

文章编号 1004-924X(2025)21-3364-09

基于冷光学技术的地基大型望远镜多波段 红外杜瓦低温光机平台

刘祥意, 姚凯男*, 李宏壮, 殷丽梅, 郭 鹏, 曹玉岩, 王建立
(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 基于冷光学技术的多波段红外成像杜瓦是实现地基大口径望远镜红外高灵敏探测的重要手段, 因此研制了一种红外相机和光机元件非共平台的多波段红外杜瓦低温(100 K)光机平台。根据需求明确低温光机平台的设计方向及设计原则, 利用柔性结构设计了变形可控的低温平台。通过有限元仿真分析研究低温光机平台热变形并进行试验验证。结果表明, 试验测量得到的长波光路在 X 方向和 Z 方向上的变化量分别为 0.37 mm 和 0.04 mm, 有限元分析得到对应的变形量为 0.387 mm 和 0.021 mm; 中波光路在 X 方向和 Y 方向上的变化量分别为 0.36 mm 和 0.03 mm, 有限元分析得到对应的变形量为 0.385 mm 和 0.031 mm。分析与实测误差均在 0.02 mm 内, 证明了低温平台设计的合理性, 确保了低温下分光镜, 长波成像镜组和中波成像镜组的准确位置。本研究对于今后基于冷光学技术的多波段成像杜瓦内的光机设计具有很高的参考价值。

关键词: 冷光学; 红外探测; 低温光机平台; 多光路

中图分类号: TH743 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20253321.3364

CSTR: 32169.14.OPE.20253321.3364

Multi-band infrared Dewar cryogenic opto-mechanical platform for ground-based large telescopes using cryogenic optics technology

LIU Xiangyi, YAO Kainan*, LI Hongzhuang, YIN Limei, GUO Peng, CAO Yuyan, WANG Jianli

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: yaokainan001@126.com

Abstract: Based on cryogenic optical technology, the multi-band infrared imaging Dewar is a key component for achieving high-sensitivity infrared detection. This paper presents a cryogenic opto-mechanical platform operating at 100 K, developed for a multi-band infrared Dewar. Design objectives and principles were established according to system requirements, and a methodology employing flexure structures was adopted to obtain a cryogenic platform with controlled deformation. Thermal deformation of the platform was then investigated by finite element analysis (FEA) and experimentally validated. For the long-wave optical path, measured displacements of 0.37 mm in the X direction and 0.04 mm in the Z direction were obtained, while FEA predicted 0.387 mm and 0.021 mm, respectively. For the mid-wave optical path, measured displacements of 0.36 mm in the X direction and 0.03 mm in the Y direction were obtained,

收稿日期: 2025-04-25; 修订日期: 2025-06-06.

基金项目: 吉林省自然科学基金资助项目 (No. 20240101309JC)

with FEA predicting 0.385 mm and 0.031 mm, respectively. All discrepancies between analysis and measurement are approximately within 0.02 mm, demonstrating the validity of the cryogenic platform design and ensuring accurate positioning of the beam splitter, long-wave imaging lens assembly, and mid-wave imaging lens assembly at cryogenic temperatures. The findings offer valuable guidance for future cryogenic opto-mechanical designs in multi-band imaging Dewar systems.

Key words: cryogenic optics; infrared detection; cryogenic opto-mechanical platform; multi-optical path

1 引言

地基红外观测长期面临大气干扰(如水汽、二氧化碳对红外波段的吸收)和热噪声的挑战。随着技术不断地进步,大型地基望远镜结合自适应光学、冷光学技术和高灵敏度红外探测器的发展逐步克服了这些限制,开启了宇宙探索的新窗口。冷光学技术是指在极低温(通常低于 120 K,甚至接近绝对零度)环境下运行的光学系统,其核心目标是抑制热噪声,提升探测灵敏度和扩展光学器件的量子极限性能^[1-6]。

在国外,冷光学技术已经广泛应用于地基大口径望远镜,在天文观测(如红外与太赫兹波段)、暗物质探测、引力波探测等领域起到至关重要的作用。如美国毛伊岛的 3.67 m 地基大口径望远镜上的 ARS 杜瓦终端,其杜瓦内光学元件的工作温度在 60 K 温区,该低温杜瓦系统可以提供 0.39~23 μm 的辐射测量数据^[7-8]。在美国夏威夷希罗(Hilo)的 8.1 m 北双子望远镜上的 NIRI 杜瓦系统,其杜瓦内光学元件的工作温度在 65 K 温区,该低温杜瓦系统可以用于观测红外特性较弱的恒星区域^[9-10]。在美国夏威夷的 10 m 级 KECK 望远镜上的 MOSFIRE 杜瓦终端,其杜瓦内光学元件的工作温度在 120 K,该低温杜瓦应用于红外光谱成像^[11-13]。相比较于国外,我国在冷光学领域发展起步较晚,在地基冷光学应用上存在一定的技术差距,如中国科学院光电技术研究所实现了工作温度在 100 K,口径为 180 mm 的低温 RC 结构成像系统^[14-15];中国科学院国家天文台南京天文台进行了红外低温材料折射率测量的研究^[16];中国科学院长春光机所在 1.23 m 地基望远镜上进行了红外冷光学的杜瓦成像终端研究探索^[17-18]。

地基大口径望远镜作为红外探测的重要仪器,其观测时间极其宝贵,设计多波段的低温红外杜瓦以同时实现不同波段的红外探测是提高

望远镜利用率的有效手段。本文基于冷光学技术,以应用于 4 m 地基大口径望远镜的红外杜瓦为背景,对可以实现多波段红外成像的杜瓦低温光机平台进行研究。

2 多波段红外杜瓦系统介绍

多波段红外杜瓦成像终端是根据现有 4 m 望远镜设计的高分辨红外成像终端,通过杜瓦内的低温分光镜进而实现中波和长波的共主光路成像,将系统的一次像面及后端的透镜组件均放置在低温杜瓦中,以降低红外的背景噪声。系统参数如表 1 所示,光机结构如图 1 所示。

表 1 多波段红外杜瓦成像终端的主要参数
Tab. 1 Key parameters of multi-band infrared Dewar imaging terminal

主要参数	参数值
口径/mm	4 000
中波 F 数	8
中波工作波段/μm	3~5
中波相机工作温度/K	77
长波 F 数	4
中波工作波段/μm	8~12
长波相机工作温度/K	60
杜瓦内镜组工作温度/K	100

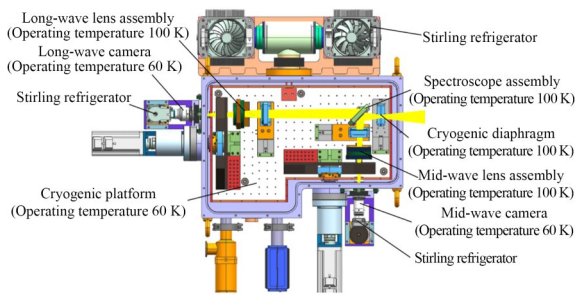


图 1 多波段红外杜瓦成像光机结构
Fig. 1 Opto-mechanical structure of multi-band infrared Dewar imaging

3 多波段红外杜瓦低温平台

3.1 光学系统设计

由于基于冷光学技术的红外冷光学系统在低温的恶劣环境下运行,因此其光机元件设计面临多重复杂挑战,主要涉及材料适配性、热-力耦合效应、加工工艺及系统集成等方面。

3.1.1 材料选择与热膨胀匹配

红外冷光学系统需在极低温(如液氮温区77 K或更低)下工作,材料的热膨胀系数(Coefficient of Thermal Expansion, CTE)差异会导致结构应力与光学元件形变,影响成像精度。系统中光机结构均采用统一材料,这样可以实现无热化设计,此外对于像镜体材料为硅(Si)或者锗(Ge)等与支撑结构(6061-T6)CTE高度不匹配时,需要采用具有自适应定位的应力释放安装方式,以避免低温收缩导致镜面畸变乃至镜体失效。

3.1.2 热管理与温度梯度控制

低温系统的热管理需平衡快速制冷与温度均匀性。使用紫铜导热板与斯特林制冷机结合,可提升热量交换效率,但需避免热短路和局部温度梯度。防辐射屏罩的多层绝热材料(如聚酰亚胺薄膜)和抛光表面设计可减少热辐射干扰。

3.1.3 机械支撑与柔性结构设计

低温下的刚性支撑易引发应力集中,需采用柔性机构(如双摆臂、挠性铰链)吸收位移。此外,无应力装配技术(如环氧胶粘接)和弹性预载销钉可降低装配应力,避免低温下结构失效。

3.1.4 系统集成与多物理场耦合

光-机-热耦合效应是系统设计的核心难点。低温真空杜瓦需兼顾密封性与热隔离,通过钛合金绝热支撑柱和聚酰亚胺隔热套减少漏热。探测器与光学系统的冷光阑匹配,真空兼容性设计(如金属波纹管密封)也需精细调控,以保证成像焦面重合度和抗温度循环疲劳能力。

3.2 光机结构设计

多波段红外杜瓦成像终端的外轮廓尺寸为

500 mm×350 mm×375 mm,如图2所示。杜瓦中的光机元件(透镜组件、分光镜组件,光阑)放置在低温平台上,低温平台的尺寸为450 mm×285 mm。低温平台工作温度为100 K,其主要通过杜瓦的斯特林制冷机进行制冷。为减少低温平台上的光机元件的温度梯度,低温平台的选择紫铜,且采取低温平台与斯特林制冷机直连的方式。为了减少热损失,低温平台通过钛合金柔性支撑柱和玻璃纤维与树脂碾压复合材料G10支撑柱进行隔热支撑,并设计防辐射屏以及使用多层绝热材料包覆^[19]。

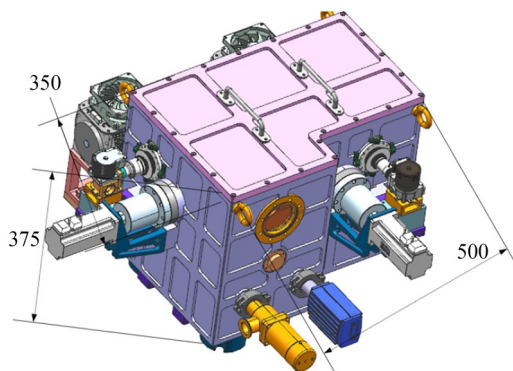


图2 杜瓦成像终端的外轮廓尺寸

Fig. 2 Overall dimensions of Dewar imaging terminal

由于低温平台上的负载较多,很难满足探测器芯片的制冷温度均匀性及稳定性要求,故中波相机和长波相机探测器芯片的制冷由相对独立的斯特林制冷机进行温控。考虑到相机斯特林制冷的散热问题,将中波相机和长波相机放在杜瓦外壁上并通过金属柔性波纹管连接,与杜瓦内部的低温平台共真空,但温度分区控制。随之产生的问题是,相机与杜瓦内低温的光机元件不共平台,从常温到低温状态下光轴必然会产生变化,需要通过柔性的合理化设计控制低温平台的变化,以满足光机装调需求。

多波段红外杜瓦成像终端的相机及光学元件的相对位置布局如图3所示。长波相机和中波相机均通过支撑结构固定在杜瓦外壁,由于杜瓦外壁一直处于室温状态,故长波相机和中波相机相对于杜瓦外壁的位置固定。而位于杜瓦内部的光学平台是通过高度为120 mm的隔热柱进行

支撑,由于热胀冷缩为材料的固有属性,低温平台由常温变为低温时,低温平台必然会随着支撑柱的收缩而沿着 X 方向的负方向移动,且收缩变形位移量为固定值,因此可以先通过仿真和试验测量,然后在安装相机时把变形位移量预留出来。

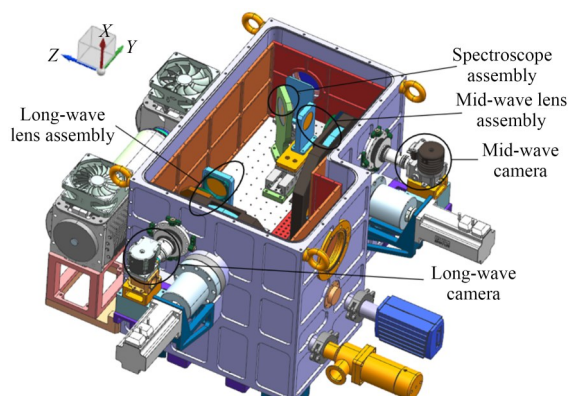


图3 相机及光学元件相对位置

Fig. 3 Relative positions of camera and optical components

为保证光束在分光过程中系统成像的稳定性,在低温平台收缩变形的过程中,低温平台的光学元件除了发生沿 X 负方向固定的位移之外,对在其他方向的位移变形也要进行严格的控制。为了确保光束经过分光镜能够沿着准确的方向进行分束,分光镜组与杜瓦外壁在 Y 和 Z 方向上的相对位置应不变。为了确保成像质量,长波透镜组与杜瓦外壁在 Z 方向上的相对位置也应不变,在 Y 方向产生的位移变形通过透镜下的调焦组件进行补偿;中波透镜组与杜瓦外壁在 Y 方向上的相对位置同样不变,在 Z 方向产生的位移变形通过透镜下的调焦组件进行补偿。低温平台的变形方向控制如图4所示。

低温平台在低温下的变形控制通过3种支撑柱来实现,3种支撑柱的位置布局如图5所示。3种支撑柱均采用三段结构形式,其中中间段采用长度为100 mm的G10支撑柱,起到主隔热的作用,上下两段均采用钛合金材料,厚度为10 mm,利用其优良的机械性合理设计柔性铰链,实现变形方向的控制。3种支撑柱分别为固定支撑、单向柔性支撑柱和双向柔性支撑柱。固定支撑柱有一组,为低温平台收缩过程中的中心位置,其

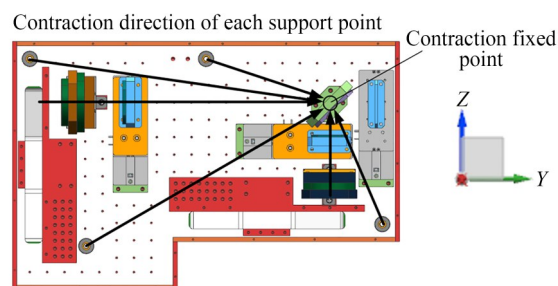


图4 低温平台变形方向控制

Fig. 4 Control of deformation direction in cryogenic platform

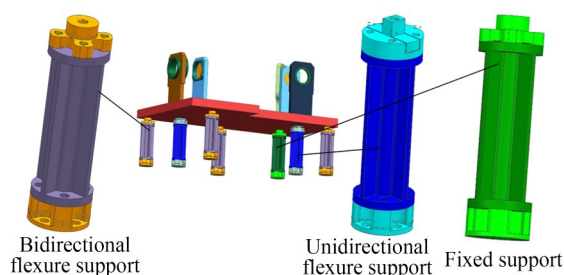


图5 低温平台的3种支撑柱

Fig. 5 Three support column of cryogenic platform

位于分光镜组正下方,用于保证平台在收缩过程中分光镜组与杜瓦外壁的相对位置不变;单向柔性支撑柱为两组,分别位于中波成像镜组和长波成像镜组的下方,以保证镜组的变形沿光路方向;双向柔性支撑柱主要用于低温平台的辅助支撑。

4 CFD 仿真分析及试验验证

4.1 有限元模型的建立

根据多波段红外杜瓦成像终端的杜瓦内部低温平台的设计,对其结构进行适当简化,然后建立有限元模型,如图6所示,设置有限元网格分析的单元数为569 270,用于分析杜瓦内低温平台的热变形情况。

4.2 CFD 仿真分析

根据杜瓦内低温平台的实际工况可知,杜瓦外壁工作温度为环境温度(假设为 22°C),低温平台7个支撑座的底面与杜瓦外壁直接接触,其温度接近环境温度,杜瓦内低温平台的工作温度为100 K,故在实际工况中应有一定的余量。设冷

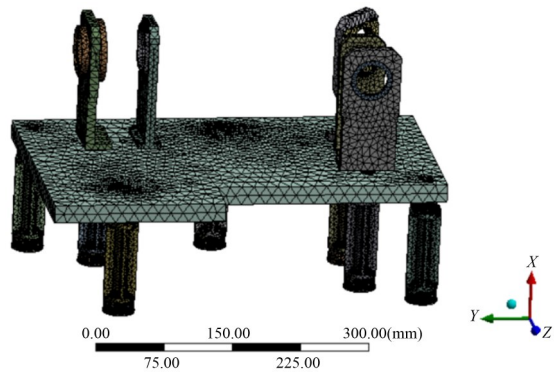


图 6 杜瓦内低温平台的有限元分析模型

Fig. 6 FEA model of Dewar-integrated cryogenic platform

头的输出温度为 96 K,杜瓦低温平台的材料为紫铜,平台上光学元件的支撑结构为 6061-T6,支撑隔热的材料为钛合金和 G10,不同材料从 300 K 到 96 K 的热胀冷缩相对变化量可参考表 2。考虑到杜瓦内为真空环境,真空度在 10^{-5} Pa 级别,且低温平台有防辐射屏和多层绝热材料包覆,忽略热辐射及热流换热等热损耗的影响,通过有限元分析得到杜瓦低温平台的变形云图如图 7 所示,温度云图如图 8 所示。

表 2 不同材料从 300 K 到 96 K 时的热胀冷缩相对变形量
Tab. 2 Relative thermal expansion and contraction deformation of different materials from 300 K to 96 K

材料	热胀冷缩的相对变形量/%
6061(铝合金)	-0.371
铜	-0.305
TC4	-0.173
G10	-0.204

为了分析光学元件的位移情况,分别提取图中 ABCDE 处圆心的位移变化情况,如表 3 所示。其中,A 代表长波透镜组,B 代表长波衰减片,C 代表分光片,D 代表中波衰减片,E 代表中波透镜组。

根据有限元仿真分析结果可知,低温平台的支撑柱对低温平台的变形进行了有效约束及控制,低温平台整体沿 X 方向平移 0.38 mm,分光镜组件在 Y 和 Z 方向上基本不动。长波光路上

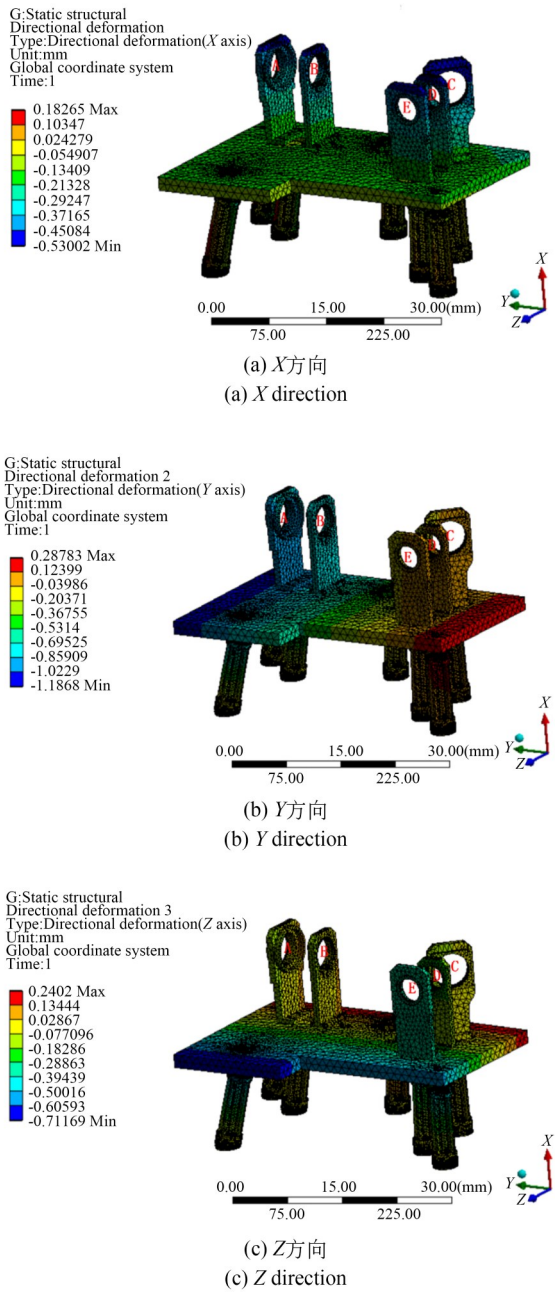


图 7 杜瓦低温平台的变形云图

Fig. 7 Deformation contour map of cryogenic platform in Dewar

的光机元件在 Z 方向上基本没有发生位移,虽然在 Y 方向产生了较大的位移,但是可以通过透镜组下面的一维位移平台移动进行补偿,以保证成像质量;中波光路上的光机元件在 Y 方向上基本没有发生位移,虽然在 Z 方向产生了较大的位移,但是可以通过透镜组下面的一维位移平台移动进行补偿以保证成像质量。

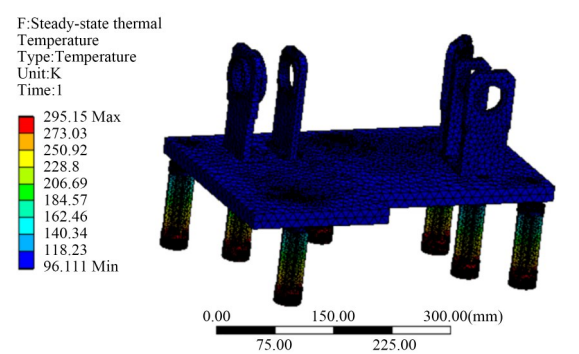


图 8 杜瓦低温平台的温度云图

Fig. 8 Temperature cloud map of Dewar's cryogenic platform

表 3 光学元件的中心位移变化

Tab. 3 Variation of central displacement of optical elements

位置	X/mm	Y/mm	Z/mm
A	0.387	-1.013	0.021
B	0.385	-0.824	0.020
C	0.378	-0.022	0.018
D	0.383	-0.028	-0.152
E	0.385	-0.031	-0.368

4.3 试验验证

根据多波段红外杜瓦成像终端的方案设计,加工了一套多波段红外杜瓦成像终端。为进一步地验证低温平台在低温下的变形情况,以研究多波段红外杜瓦的工作性能,通过光学测量的方法对低温平台的变形进行实测,搭建的测试平台如图 9 所示。在中波、长波分光片的位置放置可见光半反半透的分光片,然后在长波透镜组的位置和中波透镜组的位置分别放置两种不同的测量分划板,接着在长波和中波相机的位置分别放置一个可见相机。由于在温降过程中,可见相机相对于杜瓦的位置不变,故通过测量分划板在杜瓦温降过程中的分划板中心变化,便可以间接测量出杜瓦低温平台的变形情况。

相机的像元尺寸为 10 μm,在杜瓦内的低温平台温降过程中,实时读取长波光路和中波光路上相机采集的靶面分划板十字中心变化量,采集图像如图 10 所示。

根据十字中心的变化量便可以计算出杜瓦内低温平台的变化量,计算得到的变化量如表 4 和表 5 以及图 11 所示。

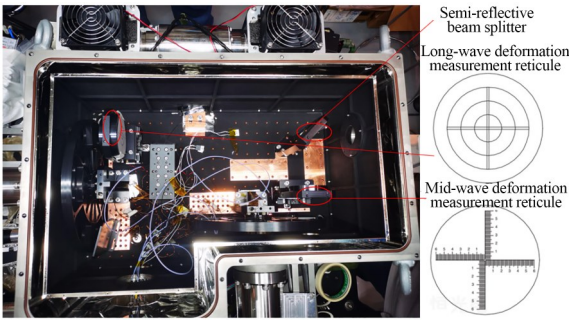


图 9 杜瓦低温平台变形测量平台

Fig. 9 Deformation measurement platform for Dewar cryogenic platform

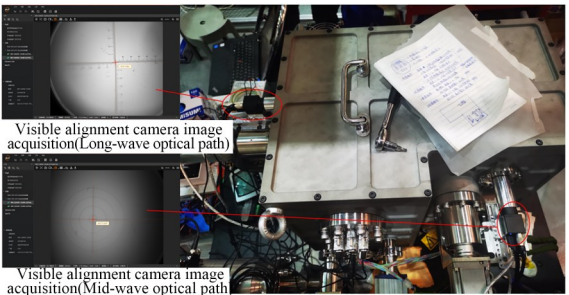


图 10 杜瓦低温平台变形测量采集图

Fig. 10 Deformation measurement acquisition image for Dewar cryogenic platform

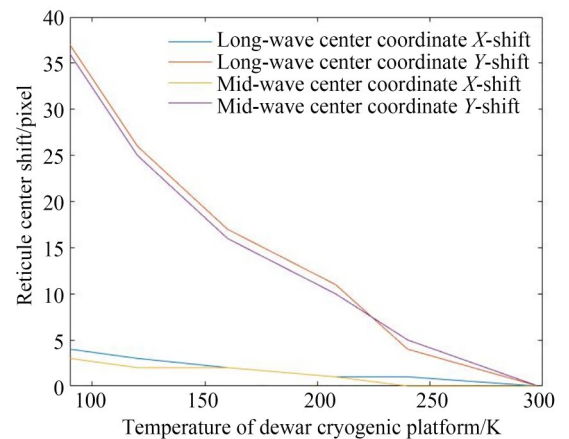


图 11 杜瓦低温平台测量点变形随温度的变化曲线

Fig. 11 Temperature-deformation curves of measurement points for Dewar cryogenic platform

从试验测量数据可知,当杜瓦内低温平台由常温降至工作温度时,长波光路中可见测量相机所测得的位移变化相当于有限元分析中 A 点的位移变化量,试验测量得到的分划板的十字中心位置的变化对应像素数变化量分别为 4 和 37,即

表 4 长波光路测量点随温度变化的变形位移

Tab. 4 Temperature-dependent deformation displacement of measurement points in long-wave infrared optical path

杜瓦内低温平台温度/K	长波光路相机中心像素变化/个		对应分析模型的坐标系的变化量/mm		
	x	y	ΔX	ΔY	ΔZ
298	0	0	0	—	0
240	1	4	0.04	—	0.01
208	1	11	0.11	—	0.01
160	2	17	0.17	—	0.02
120	3	26	0.26	—	0.03
90	4	37	0.37	—	0.04

表 5 中波光路测量点随温度变化的变形位移

Tab. 5 Temperature-dependent deformation displacement of measurement points in medium-wave infrared optical path

杜瓦内低温平台温度/K	中波光路相机中心像素变化/个		对应分析模型的坐标系的变化量/mm		
	x	y	ΔX	ΔY	ΔZ
298	0	0	0	0	—
240	0	5	0.05	0.00	—
208	1	10	0.10	0.01	—
160	2	16	0.16	0.02	—
120	2	25	0.25	0.02	—
90	3	36	0.36	0.03	—

对应分析模型坐标系下的 X 方向和 Z 方向的变化量分别为 0.37 mm 和 0.04 mm;而有限元分析得到 A 点在 X 方向和 Z 方向上的变化量为 0.387 mm 和 0.021 mm,试验测量结果与有限元分析变化量误差不超过 0.02 mm;中波光路中可见测量相机所测得的位移变化,相当于有限元分析中 E 点的位移变化量,试验测量得到的分划板的十字中心位置变化对应像素数变化量分别为 36 和 3,即对应分析模型坐标系下的 X 方向和 Y 方向上的变化量分别为 0.36 mm 和 0.03 mm,而有限元分析得到 E 点在 X 方向和 Y 方向上的变化量为 0.385 mm 和 0.031 mm,试验测量与有限元分析的结果误差不超过 0.03 mm。由此说明,低温平台在低温下的热变形得到了有效控制,其整体降低高度约为 0.365 mm,与有限元分析的 0.38 mm 误差不超过 0.02 mm,故在长波相机和中波相机的安装装调过程中需要预留出 0.365 mm 的偏置量。其长波光路在 Z 方向上的变形和中波光路在 Y 方向的变形均得到了有效控制,而长波光路 Y 方向的变形和中波

光路 Z 方向的变形只影响相机的调焦,不影响相机的成像质量,故可以通过透镜组下面的一维调整台根据相机的成像虚实来补偿。

5 结 论

基于冷光学技术的地基大型望远镜多波段红外杜瓦成像终端,其红外相机与低温光机元件非共平台,由于光机装调环境与工作环境具有很大的温度差异性,很难同时保证多个光路在低温平台温降过程中的稳定性。本文通过设计合理的低温平台支撑,精准控制低温平台在低温下的变形,分别通过有限元分析和试验验证了平台支撑结构对低温平台变形的影响,并进行了精准控制。试验测量得到长波光路在 X 方向和 Z 方向上的变化量分别为 0.37 mm 和 0.04 mm,有限元分析得到的变形量分别为 0.387 mm 和 0.021 mm;中波光路在 X 方向和 Y 方向上的变化量分别为 0.36 mm 和 0.03 mm,有限元分析得到的变形量分别为 0.385 mm 和 0.031 mm。分析与实测误差均在 0.02 mm 内,证明了低温平台支撑的

合理性。在顺应材料热胀冷缩固有热变形的前提下,确保了低温下分光镜、长波成像镜组和中波成像镜组的准确位置,为光机装调提供指导,确保了光学系统的成像质量。本研究对基于冷光学技术的多波段非共平台成像杜瓦内的光机设计具有很高的参考价值。

参考文献:

- [1] 王世涛,张伟,王强. 红外探测器件在低温背景下的探测率测试[J]. 光学精密工程, 2012, 20(3): 484-491.
WANG SH T, ZHANG W, WANG Q. Measurement for detectivity of infrared detectors in low temperature background [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3): 484-491. (in Chinese)
- [2] 陈俊林,王小坤,朱海勇,等. 冷光学用多波段长波红外探测器杜瓦封装技术[J]. 中国激光, 2022, 49(21): 192-198.
CHEN J L, WANG X K, ZHU H Y, *et al.* Dewar packaging technology of multiband long-wave infrared focal plane array detectors for cryogenic optics [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(21): 192-198. (in Chinese)
- [3] 殷丽梅,刘莹奇,李洪文. 实现高精度红外探测的冷光学技术[J]. 红外技术, 2013, 35(9): 535-540.
YIN L M, LIU Y Q, LI H W. Cold optics technology to achieve high-accuracy infrared detection [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(9): 535-540. (in Chinese)
- [4] 朱海勇,曾智江,孙闻,等. 冷光学用大口径 $2\text{ k}\times 2\text{ k}$ 红外探测器组件封装技术[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(5): 81-90.
ZHU H Y, ZENG ZH J, SUN W, *et al.* Dewar packaging technology of large-aperture $2\text{ k}\times 2\text{ k}$ infrared detector for cryogenic optics [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(5): 81-90. (in Chinese)
- [5] 程景全. 天文望远镜原理和设计[M]. 南京: 南京大学出版社, 2020.
CHENG J Q. *Principle and Design of Astronomical Telescope* [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2020. (in Chinese)
- [6] 胡明灯,熊雄,吴建乐,等. 红外探测器冷屏设计[J]. 光学学报, 2023, 43(9): 17-24.
HU M D, XIONG X, WU J L, *et al.* Design of cold shield in infrared detector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(9): 17-24. (in Chinese)
- 作者贡献说明:
刘祥意:测量方法的提出,论文构思和撰写;
李宏壮、殷丽梅:测量试验的设计及数据整理和分析;
姚凯男、王建立:论文的审核及指导;
郭鹏、曹玉岩:试验数据分析。
- [7] PRITCHETT D CU, HENDRICK JR R W, MOORE D K, *et al.* AEOS radiometer system: a multichannel imaging radiometer [C]. *Aero-Sense'99, International Society for Optics and Photonics*, 1999:206-213.
- [8] VIGIL M L, WITTE D J, LEVAN P D, *et al.* Sensor suite for the advanced electro-optical system (AEOS) 3. 6-m telescope [C]. *Optics & Photonics*, 1996.
- [9] HODAPP K W, JENSEN J B, IRWIN E M, *et al.* The gemini near-infrared imager (NIRI) [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2003, 115(814): 1388-1406.
- [10] MCGREGOR P J, HART J, CONROY P G, *et al.* Gemini near-infrared integral field spectrograph (NIFS) [C]. *Instrument Design and Performance for Optical/Infrared Ground-based Telescopes. Waikoloa, Hawai'i, USA. SPIE*, 2003: 1581.
- [11] MCLEAN I S, STEIDEL C C, EPPS H W, *et al.* MOSFIRE, the multi-object spectrometer for infra-red exploration at the Keck Observatory [C]. *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV. Amsterdam, Netherlands. SPIE*, 2012: 84460J.
- [12] MCLEAN I S, STEIDEL C C, EPPS H, *et al.* Design and development of MOSFIRE: the multi-object spectrometer for infrared exploration at the keck observatory [C]. *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy III. San Diego, California, USA. SPIE*, 2010: 77351E.
- [13] KULAS K R, MCLEAN I S, STEIDEL C C. Performance of the HgCdTe detector for MOSFIRE, an imager and multi-object spectrometer for Keck Observatory [C]. *High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy V. Amsterdam, Netherlands. SPIE*, 2012: 84531S.
- [14] 沈忙作,马文礼,廖胜,等. 低温光学系统的研制[J]. 光学学报, 2001, 21(2): 202-205.

- SHEN M Z, MA W L, LIAO SH, *et al.* Development of a cryogenic optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(2): 202-205. (in Chinese)
- [15] 张晓宏. RC 光学系统低温测试技术研究[J]. *应用光学*, 1999, 20(6): 34-38.
- ZHANG X H. Research of cryogenic measuring technology for rc optical system[J]. *Journal of Applied Optics*, 1999, 20(6): 34-38. (in Chinese)
- [16] 王建国, 倪磊, 向北平, 等. 红外材料低温线膨胀系数测量装置的设计及其误差分析[J]. *西南科技大学学报*, 2022, 37(3): 77-82.
- WANG J G, NI L, XIANG B P, *et al.* Design and error analysis of measuring device for low temperature linear expansion coefficient of infrared materials[J]. *Journal of Southwest University of Science and Technology*, 2022, 37(3): 77-82. (in Chinese)
- [17] 刘祥意, 张景旭, 乔兵, 等. 应用于冷光学组件的透镜支撑技术研究[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(7): 1850-1856.
- LIU X Y, ZHANG J X, QIAO B, *et al.* Research on supporting technology of lens applied in cold optics assembly [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(7): 1850-1856. (in Chinese)
- [18] 黄智国, 王建立, 殷丽梅, 等. 多波段冷光学红外成像终端研制[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(9): 57-65.
- HUANG ZH G, WANG J L, YIN L M, *et al.* Development of cold optical infrared imaging terminal with multiband [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(9): 57-65. (in Chinese)
- [19] 李文雄, 申军立, 张星祥, 等. 低温红外离轴三反准直系统设计[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(9): 1285-1294.
- LI W X, SHEN J L, ZHANG X X, *et al.* Design of low temperature infrared off-axis three-mirror collimation system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(9): 1285-1294. (in Chinese)

作者简介:



刘祥意(1987—),男,吉林敦化人,博士,副研究员,2012年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,2015年于中国科学院长春光机所获得博士学位,主要从事地基大口径望远镜的光机结构设计。E-mail: liuxiangyi107@163.com